

# SWAT 모형의 지표유출해석 알고리즘 개선

이정우\* · 김남원\*\* · 이정은\*\*\*

Lee, Jeongwoo\*, Kim, Nam Won\*\*, Lee, Jeong Eun\*\*\*

## Modification of Surface Flow Analysis Algorithm in SWAT

### ABSTRACT

SWAT model usually underestimates daily peak discharges. To resolve this problem, in this study, the algorithm related with the surface flow simulation was modified by partitioning excessive infiltration based on the relative length between overland flow time of concentration and percolation travel time in soil water zone and by computing time of concentration varying with the amount of surface flow. The modified SWAT was applied to the Chungju dam watershed to assess the increasing effects of daily peak discharges. The daily peaks simulated by the modified SWAT were on average 10% higher than those by original SWAT for the peaks above 5,000 m<sup>3</sup>/s. The modified SWAT was found to be able to more accurately reproduce daily peaks, particularly showing increase rates of 9.9%, 18.6% and 12.6%, respectively, for top three peaks that occurred in the years of 1990, 2002, and 2006.

**Key words** : SWAT, Daily peak discharge, Excessive infiltration, Time of concentration

### 초록

본 연구에서는 SWAT 모형으로 일 유출량을 모의할 경우에 수문곡선의 침투부가 과소하게 산정되는 문제를 개선하기 위해서 지표유출의 집중 시간과 토양수의 연직 유하시간의 상대적 길이를 고려하여 초과침투량의 일부를 지표유출량에 추가로 할당하고 지표유출량의 크기에 따라 집중 시간이 가변적으로 계산되도록 지표유출해석 알고리즘을 수정하였다. 개선된 SWAT 모형을 충주댐 상류유역에 적용한 결과 침투유량이 5,000 m<sup>3</sup>/s를 넘는 경우 평균적으로 약 10% 만큼 침투부 증가효과를 나타내었다. 특히 큰 홍수가 발생하였던 1990년, 2002년, 2006년 세 개 사상에 대해 각각 9.9%, 18.6%, 12.6% 만큼 침투유량이 증가하는 등 일 유출수문곡선의 침투부를 보다 정확하게 모의하였다.

**검색어** : SWAT, 일 침투유량, 초과침투량, 집중시간

## 1. 서론

미국 농무성에서 개발된 SWAT (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005)은 기상, 토양, 토지이용 조건에 따른 강우, 증발산, 침투, 유출 등의 수문순환 과정, 유역 및 하도내 유사 거동, 인이나 질소의 순환 및 이송 과정, 그리고 작물의 생장 및 소멸 과정 등을 모의할 수 있는 통합수문모형이다. 이 모형은 수문기상조건에 따른 자연적인 유역계의 변화뿐만 아니라 댐 운영, 하천수 취수, 하폐수 방류 등 물 이용 및 물 이동 체계를 고려할 수 있어 인위적인 영향을 분석하는 데에도 유용하게 활용된다. SWAT 모형은 준분포형(semidistributed), 연속형(continuous) 수문모형으로 장기유출해석에 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라, 수문, 수질 모의가 함께 연동되어 통합적 해석이 가능하고, 거시적이지만 작물 생장, 수확 모의를 통한 농업생산성 예측도 가능하여 전세계적으로 수자원,

\* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil engineering and building Technology · ljw2961@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구위원 (Korea Institute of Civil engineering and building Technology · nwkim@kict.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실, 수석연구원 (Korea Institute of Civil engineering and building Technology · jeuss22@kict.re.kr)

Received March 23, 2016/ revised April 6, 2016/ accepted April 26, 2016

환경, 그리고 생태 분야까지 그 활용도가 커지고 있다.

SWAT은 CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard et al., 1987), EPIC (Izaurre et al., 2006) 모형을 통합한 SWRRB (Arnold and Williams, 1990) 모형을 근간으로 하고 있으며, 유출량 및 유사량에 대한 하도추적 모형 ROTO (Arnold, 1995)가 추가로 결합되어 소유역 분할 및 상하류 연계가 완성되었다. 최초 버전이 출시된 이후에 지금까지 민감도 및 최적화 루틴 개선, GIS 환경의 개선, Landscape 부모형 추가, 글로벌 기상자료와의 연계 등 지속적으로 모형이 업그레이드되고 있다. 또한 모형의 기능과 적용성 향상을 위해서 SWIM (Krysanova et al., 2000), SWAT-MODFLOW(Kim et al., 2008), SWAT-SWMM(Kim et al., 2011)처럼 다른 모형과의 결합을 시도한 연구도 수행되었다. 이와 같이 사용자 환경과 기능적 측면 위주의 많은 발전이 있었으나, 수문이나 수질 성분 모의 결과의 정확도를 높여려는 연구는 상대적으로 많지 않다. SWAT 모형에서 물리적 혹은 개념적 매개변수들의 권장 사용값 범위를 제시하고 있고 실제로 해당 유역에 맞게 검보정 과정을 거쳐 모형이 적용되고 있지만, 근본적으로 국내 유역 특성이 모형의 개발국 조건과 상이하기 때문에 검보정 과정만으로는 모의 정확도를 높이는 데에는 한계가 있으며, 따라서 모형의 근본적인 구조 개선이 수반되어야 할 경우도 발생한다.

수문곡선의 형태뿐만 아니라 장기간 물균형(water balance)이 유지되도록 모델링을 수행해야 하는데, 수문곡선의 침투부가 작게 모의되면 갈수기 유량이 크게 모의될 수밖에 없어 물수지 분석시 오차를 유발하게 된다. 이는 물수지 분석 결과뿐만 아니라 유사 및 비점오염 부하량 모의 결과에도 영향을 미친다. 특히 Kim et al.(2005), Kuntiyawichai et al.(2011)의 연구에서와 같이 SWAT 모의 유출량을 이용한 홍수빈도분석을 수행할 경우에 침투유출량 모의 성능이 그 결과의 신뢰성에 절대적인 영향을 준다. 따라서 유출수문곡선의 침투부를 보다 정교하게 모의할 수 있도록 모형 개선에 관한 연구가 필요하다.

Eckhardt et al.(2002), Van Liew and Garbrechet(2003), Bosch et al.(2004), Fohrer et al.(2005), Govender and Everson(2005), Borah et al.(2007), Kim and Lee(2008), Xie and Cui(2011) 등 많은 연구에서 지적했듯이 SWAT 모형으로 일 유출량을 산정하면 수문곡선의 침투부(peak discharge)가 작게 산정되는 경향이 있다. 특히 Borah et al.(2007)은 큰 호우가 발생했을 때 이러한 침투부가 과소 문제가 빈번하게 발생한다고 하였고, Bosch et al.(2004)은 유역면적이 작을수록 침투부 과소 문제가 더 크게 발생한다고 하였다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 Eckhardt et al.(2002)은 다수의 층으로 구분된 토양대내 연직이동을 하부토양층의 포화여부에 따라 제어하도록 침투량 연산 알고리즘을 수정하여 지표 및 중간유출량이 크게 계산되도록 모형을

개선하였다. Van Liew and Garbrechet(2003)와 Kim and Lee(2008)는 침투부 과소 산정의 주된 이유를 SWAT 모형의 지표유출 모의 알고리즘이 급일 토양수분량이 아닌 전날 기준의 토양수분량에 따라 유출곡선지수(runoff curve number, CN)를 계산하는 구조를 가지기 때문이라고 주장하였다. 이에 따라 Kim and Lee(2008)는 급일 발생한 경우로 인한 토양수분의 증가 영향을 반영할 수 있도록 유출곡선지수 산정 알고리즘을 개선하고 그 효과를 입증하였다. Kannan et al.(2007)은 토양수분량이 아닌 강우량과 증발산량에 따라 유출곡선지수가 계산되도록 모형을 수정하였다.

이처럼 침투부 과소 모의라는 SWAT 모형의 약점이 알려져 있음에도 불구하고, 침투부 모의 정확도 향상에 관한 연구는 매우 드물게 수행되었으며, 특히 국내에서는 Kim and Lee (2008)의 연구를 제외하고는 유출 구조 개선과 관련된 연구를 찾아보기 어렵다. 또한 Kim and Lee (2008)가 제안한 가중평균유출곡선지수법을 사용하여 침투부 과소 문제를 상당 부분 해소할 수는 있지만 대규모 홍수사상에 대해 침투를 크게 증가시키기 위해 가중치를 작게 설정할 경우 다른 작은 유출사상에도 영향을 미쳐 침투부가 관측치에 비해 비이상적으로 크게 모의되는 경향을 나타내곤 한다. 즉, 이 방법은 강우에 대한 유출의 민감도를 증대시킬 수 있어 전 기간동안 침투부를 증가시키는 효과는 있으나, 홍수가 큰 유출발생시에만 집중적으로 침투부를 증가시키는데는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 SWAT 모형으로 일 유출량을 모의할 경우에 유출수문곡선의 침투부가 과소하게 산정되는 단점을 개선하고, 홍수가 큰 강우사상에 대해서는 유출량이 민감하게 반응하고 비홍수가 작은 강우사상에 대해서는 유출량이 상대적으로 둔감하게 반응할 수 있도록 지표유출과 침투의 이동시간을 고려한 초과침투량 분할기법과 지표유출량의 크기를 고려한 가변 집중시간 산정 기법을 지표유출량 계산 모듈에 탑재하여 모형을 개선하고, 이를 충주댐 상류유역에 적용하여 유출수문곡선의 침투부 모의 증가 효과를 분석, 제시하였다.

## 2. SWAT 모형의 지표유출량 계산 알고리즘

### 2.1 수문성분량 모의 방법

SWAT 모형의 수문성분량 모의는 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수유출 순으로 이루어진다. 식생에 의한 강수차단량은 최대차단량에 최대면적지수에 대한 해당일 엽면적지수의 비를 곱해 산정하거나, 지표면유출량 산정시 초기손실에 포함시켜 차단 효과를 고려한다. 지면에 내린 강수량은 토양수분조건에 따라 일별로 변하는 수정 NRCS 유출곡선 지수법 또는 Green-Ampt 방법에 따라 지표유출량 및 침투량으로 분할된

다. 잠재증발산량은 기상자료를 바탕으로 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방법 등으로 계산되며, 여기에 토양 수분 부족분을 고려하여 실제증발산량이 산정된다. 토양층에서의 중간유출량은 포화수리전도도, 공극률, 경사장 및 경사, 그리고 가용토양수분량의 함수로 계산되며, 토양층에서 연직하향으로의 침투량은 토양의 포화수리전도도, 포장용수량, 포화수분량, 가용토양수분량 등의 함수로 계산된다. 토양층 최하단부로부터 지하수면까지의 침투-함양 과정은 선형저수지 추적을 통해 시간적으로 지체되고, 함양-지하수유출 과정 또한 선형저수지 추적을 통해 급일 함양량과 작일 배출량의 기중합으로 계산된다. 지표유출량, 중간유출량, 지하수유출량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 하천유출량이 계산된다.

## 2.2 지표유출 모의 방법

SWAT 모형에서 지표유출량(surface flow)은 NRCS 유출곡선 지수법이나 Green & Ampt 방법에 의해 계산되며, Eqs. (1) and (2)로 나타낸 바와 같이 유출곡선지수법이 주로 이용되고 있다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \cong \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (1)$$

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 총강우량(mm),  $Q$ 는 지표유출량(mm),  $I_a$  ( $\cong 0.2S$ )는 유출 이전의 지면저류, 엽면차단, 증발, 침투를 포함하는 초기손실량(mm),  $F$ 는  $I_a$ 를 제외한 침투량(mm),  $S$ 는 최대잠재보유수량(mm), 그리고  $CN$ 는 유출곡선지수이다. 강우-유출사상모형(event based rainfall-runoff model)에서  $Q$ 는 초과우량 또는 직접유출량이라 하지만, SWAT 모형과 같이 연속형 수문모형(continuous hydrological model)에서는 유출성분을 지표, 중간, 지하수 유출 3가지로 구분하기에  $Q$ 를 지표유출량(surface flow)으로 명명하고 있다.

SWAT 모형과 같이 유출곡선지수법을 사용하는 일 단위 장기유출모형에서는 일 강우량을 하나의 강우사상으로 간주하고 매일 토양수분조건에 따라  $CN$ 값을 산정한다. SWAT 모형에서는 토양층의 포장용수량, 위조점, 포화수분량 등의 토양 특성을 고려하여 Eq. (3)과 같이 토양수분량  $SW$ 에 따라  $S$ 가 일단위로 계산된다.

$$S = S_{mx} \left( 1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 SW)]} \right) \quad (3)$$

여기서,  $S_{mx}$ 는 위조점일 때의  $S$  값,  $SW$ 는 위조점에서의 토양수

분량(WP)을 제외한 전체 토양층의 수분함량이고, 그리고  $w_1$ 과  $w_2$ 는  $SW-S$  관계곡선 형태를 결정하는 형상계수이다.

## 2.3 지표유출의 지체

SWAT의 수문응답단위인 HRU (Hydrological Response Unit) 별로 지표유출량이 계산되면, Eq. (4)와 같이 유역내 지체를 고려하여 해당 일에 주하도로 배출되는 양이 산정된다.

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q'_{stor, i-1}) \left( 1 - \exp \left[ \frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (4)$$

여기서,  $Q_{surf}$ 는 주어진 날에 주 하도로 배출되는 지표유출량(mm),  $Q'_{surf}$ 는 Eq. (1)로 계산된 HRU내 지표유출량(mm),  $Q'_{stor, i-1}$ 는 전날 하도로 배출되지 못하고 저류된 지표유출량(mm),  $surlag$ 는 지표유출 지체계수, 그리고  $t_{conc}$ 는 집중시간(time of concentration)(hr)이다. 집중시간은 Eq. (5)-(7)과 같이 유집시간(overland flow time of concentration)과 유하시간(channel flow time of concentration)의 합으로 계산된다.

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (5)$$

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad (6)$$

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad (7)$$

여기서,  $t_{ov}$ 는 유집시간(hr),  $t_{ch}$ (hr)은 유하시간,  $L_{slp}$ 는 소유역 경사장(m),  $n$ 은 Manning 조도계수,  $slp$ 는 소유역 평균경사(m/m),  $L$ 은 하도길이(km),  $slp_{ch}$ 는 하도경사(m/m), 그리고  $Area$ 는 소유역 면적(km<sup>2</sup>)이며 HRU 단위의 집중시간 계산시에는 HRU 면적(km<sup>2</sup>)이 사용된다.

## 3. SWAT 모형의 개선

### 3.1 초과침투량 분할 기법

SWAT 모형에서는 Fig. 1과 같이 강우량  $P$ 가 발생하였을 때 토양수분량  $V_0$ 를 고려하여 결정된 유출곡선지수에 따라 지표유출량  $Q$ 와 침투량  $F$ 를 계산하고, 계산된 침투량이 해당일의 토양수분부족분(soil water deficit)  $V$ 를 초과하면, 즉, 완전포화시 토양층의 수분량에서 전날 남아있는 토양수분량을 감한 값을 초과한 경우에는 그 초과분(이하 초과침투량; excessive infiltration,  $F_{ex}$ )

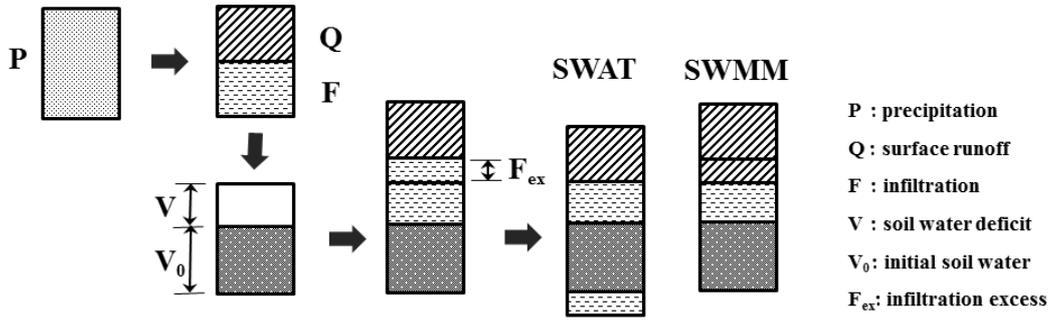


Fig. 1. Schematic Diagram for Treating Excessive Infiltration (SWAT and SWMM)

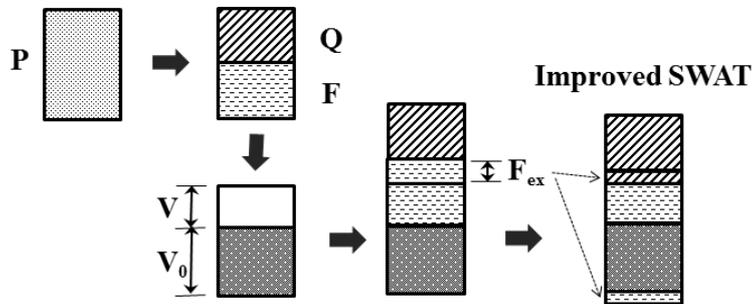


Fig. 2. Schematic Diagram for Treating Excessive Infiltration (modified SWAT)

전량을 강제적으로 토양수량에 더해지도록 처리하고 있다. 한편, 도시유출해석에 널리 이용되고 있고 사상형(event) 및 연속형(continuous) 수문모의가 가능한 SWMM (Storm Water Management Model) 모형(Huber and Dickinson, 1988; Rossman, 2004)에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 초과침투량 전량을 지표면 유출량에 더해지도록 처리하고 있다. 즉, SWMM 방식이 SWAT에 비해 지표유출량이 더 크게 산정되는 구조를 가지고 있다. 따라서 SWMM 모형은 초과침투량의 연직 이동을 제한하였기에 토양층의 투수성이 작고 경사가 급하여 연직 보다는 수평 이동이 지배적인 지역에 적합하고, 반면에 SWAT 모형은 투수성이 크거나 경사가 완만하여 토양층 하부로의 연직 이동이 우세한 지역에 보다 적합한 지표면 유출 계산 구조를 가진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 상기 두 방식을 접목하여 토양이 습하고 큰 호우사상에 대해서는 유출량이 민감하게 반응하고 상대적으로 건조하고 작은 호우사상에 대해서는 유출량이 상대적으로 둔감하게 반응할 수 있도록 초과침투량 분할 기법을 제안하였다. 이 기법은 지표유출의 집중시간과 토양층내 침투의 유하시간간의 상대적인 크기를 고려하여 초과침투량을 지표유출량과 침투량에 배분하는 방식을 취하고 있다. Fig. 2는 초과침투량 분할기법의 개념도를 나타낸 것이다.

개선된 SWAT 모형에서는 유출곡선지수법에 의해 산정된 침투량이 토양의 최대보수능력을 초과하였을 경우, 지표유출의 집중시

간과 침투의 유하시간을 각각 Eqs. (5) and (9)로 계산하고, 각 시간에 반비례하여 Eq. (8)에 따라 초과침투량을 분배하여 지표유출량과 침투량에 더해지도록 하였다.

$$Q_{adj} = Q + \alpha F_{ex} \tag{8a}$$

$$F_{adj} = F + (1 - \alpha) F_{ex} \tag{8b}$$

$$\alpha = TT_{perc} / (TT_{perc} + t_{conc}) \tag{8c}$$

여기서,  $Q_{adj}$ 는 조정 지표유출량,  $F_{adj}$ 는 조정 침투량,  $\alpha$ 는 배분계수,  $t_{conc}$ 는 지표유출 집중시간, 그리고  $TT_{perc}$ 는 토양층내 침투 유하시간으로 Eq. (9)에 따라 각 토양층별로 계산되어 합산된 값이다. SWAT 모형에서 토양수량이 포장용수량을 초과할 때 상부 토양층에서 하부 토양층으로의 수분 이동을 침투(percolation)라 정의하고 있으며, 저류추적법으로 그 양을 계산하고 있다. 침투 유하시간은 각 토양층별로 다음과 같이 계산된다.

$$TT_{perc,ly} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \tag{9}$$

여기서,  $TT_{perc}$ 는 침투 유하시간(travel time for percolation)

(hrs),  $SAT_{ly}$ 는 완전포화시 토양층내 수분량(mm),  $FC_{ly}$ 는 포장용 수량(mm), 그리고  $K_{sat}$ 는 토양층에 대한 포화 수리전도도(mm/h)이다.

초기에 계산된 지표면 유출량이 50 mm, 침투량이 50 mm이고 토양수대의 포화용량이 50 mm, 토양수분량이 30 mm인 경우를 예로 들면, 침투량이 토양의 최대보수능력 20 mm(50 mm - 30 mm)을 넘기 때문에 초과침투량 30 mm가 발생한다. 이 때 지표면 유출 집중시간과 침투 유하시간이 각각 2시간, 4시간이라면, 시간에 역비례해서 초과침투량 30 mm의 2/3는 지표유출량 50 mm에 더해지고, 1/3은 침투량 20 mm에 더해져서 최종적으로 각각 지표유출량은 70 mm, 침투량은 30 mm로 계산된다.

### 3.2 가변 집중시간 산정 기법

SWAT 모형에서 지표면 유출의 지체는 Eq. (4)와 같이 집중시간의 함수로 표현하고 있는데, 집중시간을 산정하기 위한 Eqs. (6) and (7)의 형태를 보면, Henderson과 Wooding(1964)의 운동파(kinematic wave) 집중시간 공식(Eq. (8))과 Manning 공식이 결합된 Woolhiser and Liggett (1967)의 집중시간 공식(Eq. (10))과 유사한 것을 알 수 있다.

$$t_c = \left( \frac{L \cdot i^{1-\beta}}{\alpha} \right)^{1/\beta} \quad (8)$$

$$q = \alpha y^\beta \quad (9)$$

여기서,  $t_c$ 는 지표유출 집중시간(overland flow time of concentration) (min),  $L$ 은 지표유출 경사장(overland flow length),  $i$ 는 초과우량의 의미인 순강우강도(net rainfall intensity)(mm/hr),  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 평판(plane)의 단위폭당 유출량  $q$ 와 유출심  $y$ 의 관계를 나타내는 Eq. (9)의 매개변수이다. 광폭수로에 대해 Manning 공식을 적용하면 Eq. (9)에서  $\alpha = S^{0.5}/n$ ,  $\beta = 5/3$ 가 되고 이를 Eq. (8)에 대입하면, Eq. (10)과 같이 Woolhiser and Liggett (1967)의 운동파 집중시간 공식을 유도할 수 있다.

$$t_c = \frac{7 n^{0.6} L^{0.6}}{S^{0.3} i^{0.4}} \quad (10)$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $S$ 는 지표유출 경사(overland flow slope)이다. Eq. (10)에서  $i$ 는 SWAT 모형에서 단위면적당 평균지표유출량(average overland flow rate)이라 정의하고 있으며 6.35 mm/hr로 가정하여 사용하고 있다. 이 값을 Eq. (10)에 대입하고 분 단위  $t_c$ 를 시간 단위로 환산하면, Eq. (6)과 같게

된다. 하도단면이 하천바닥폭과 깊이의 비가 2:1, 측면경사가 1:2인 사다리꼴 형태이고, 평균 하도유출률(average channel flow rate)을 평균 지표유출률에 소유역 면적의-0.5승을 곱한 값과 같다는 가정하에 Eq. (10)을 적용하면, SWAT의 유하시간 산정공식 Eq. (7)이 유도된다.

이상과 같이 SWAT의 집중시간 산정은 운동파 이론에 근거하고 있음을 알 수 있으며, 지표유출에 기여하는 초과우량을 6.35 mm/hr로 고정값을 사용하고 있다. 여기서 고정값 6.35 mm/hr는 큰 호우 사상에 적용하기에는 과소한 값이며 이로 인해 Eq. (4)의 우변의 두 번째 괄호 항의 값이 작아져 해당 일에 하도로 유입되는 지표유출량이 작게 산정될 수 있다. 한편, Yen and Chow (1983)은 초과우량으로 80.0 mm/hr로 큰 값을 사용하여 운동파 집중시간 Eq. (10)을 근사화하였으며, SWAT의 개선 모형인 SWIM 모형에서는 초과우량을 고정값으로 가정하지 않고 모의과정에서 일 단위로 계산되는 지표유출량을 강우지속시간으로 나눈 값을 사용하고 있다.

본 연구에서는 SWIM 모형의 방식을 도입하여 집중시간 계산시 고정값 6.35 mm/hr 대신에 일 단위로 계산되는 지표유출량을 강우지속시간으로 나눈값이 입력되도록 모형을 수정하였다. 강우 지속시간은 하루 24시간 중에서 강우가 발생한 시간을 날짜별로 입력하거나, 일 강우량과 하루 24시간 대비 실제 강우 발생시간의 비율간의 평균적인 관계로부터 모형에서 자동으로 계산되게 모형화하였다. 개선 후 SWAT 모형은 지표유출량의 크기에 따라 집중시간을 가변적으로 산정하게 함으로써 홍수기와 같이 강우량이 많고 습윤한 상태에서 수문곡선의 침투부가 기존 SWAT 결과에 비해 크게 계산되게 할 수 있으며, 또한 비홍수기 작은 규모의 호우사상에 대해서는 집중시간을 상대적으로 길게 계산하여 수문곡선형태를 매끄럽게 할 수 있는 장점이 있다. 단, 초과우량이 0인 경우 Eq. (10)에서 분모가 0이 되어 계산이 되지 않거나, 초과우량이 매우 작아 극단적으로 집중시간이 길게 계산되는 것을 방지하고자  $i$ 의 하한값을 0.1 mm로 설정하였다.

초과침투량 분할기법은 집중시간의 함수이고, 가변 집중시간 산정기법은 초과침투량에 영향을 받는 지표유출량의 함수이므로 서로 음해적인 관계를 갖는다. 따라서 두 기법을 함께 적용하기 위해서는 지표유출량을 반복절차(iteration)를 거쳐 산정해야 한다. 계산 절차는 1) 유출곡선지수법으로 지표유출량 및 침투량 계산, 2) 침투량과 토양층 수분 부족분과의 비교를 통한 초과침투량 계산, 3) 집중시간과 침투시간의 상대비율에 따라 초과침투량을 분할하여 지표유출량 및 침투량 재계산, 4) 지표유출량 재계산값을 이용한 집중시간 재계산, 5) 지표유출량의 변화량이 허용오차 이내에 들어올 때까지 3)과 4) 과정의 반복 등의 순으로 이루어진다. 초과침투량의 일부가 지표유출량에 더해지기 때문에 집중시간이 단축되어 하도로 해당 일에 배출되는 지표유출량이 커져서 하천유

량의 침투부 증가효과를 크게 가져올 수 있다.

#### 4. 모형의 구축 및 개선 효과

##### 4.1 대상 유역 및 모형 구축

초과침투량 분할기법과 가변 집중시간 산정기법을 탑재한 SWAT모형(SWAT<sub>EXINF\_VTC</sub>)의 개선 효과를 평가하기 위해서 Fig. 3과 같이 충주댐 상류유역을 분석 대상유역으로 선정하였다. 모형의 입력자료로서 강수량 자료는 영월 외 31개 우량관측소, 기타 기상자료는 충주 외 7개 기상관측소 자료를 이용하였다. 수치 표고모델(DEM)은 국가수자원관리종합정보에서 제공하는 30 m × 30 m 해상도의 DEM을 SWAT 모형의 계산 효율을 고려하여 100 m × 100 m로 가공하여 사용하였으며, 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 사용하였다. 자세한 대상유역 및 입력자료에 관한 내용은 Kim et al. (2007)의 논문을 참조할 수 있다.

모형의 검보정은 1986년부터 2007년까지의 모의기간동안 연평균 유출고의 관측치와 모의치의 차이를 최소화하면서 일단위 모의 유출수문곡선을 관측치에 잘 적합할 때까지 모형의 검보정을 수행하였다. 유출수문곡선의 침투부를 크게 하기 위해 AMC-II일 때의 유출곡선지수(CN2)를 디플트값에 비해 20% 만큼 증가시키고, 토양물성치인 포장용수량과 위조점에서의 토양수분량의 차이인 가용토양수분량 AWC (available water capacity)를 1.2배 증가시켰다. 유출수문곡선의 감수부 형상을 관측치에 적합시키기 위해 기저유출 감수상수(ALPHA\_BF)를 0.01을 사용하였다. 또한, 기

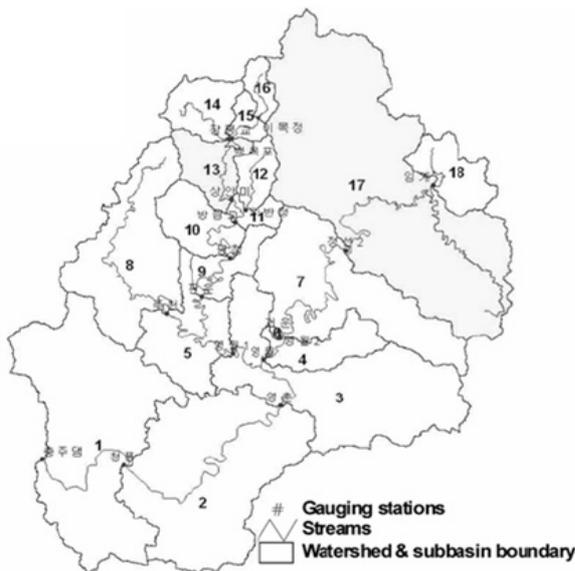
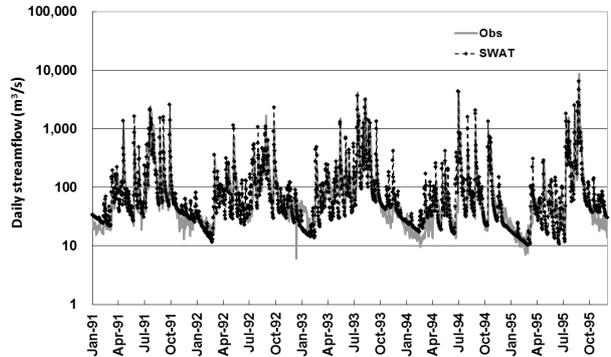


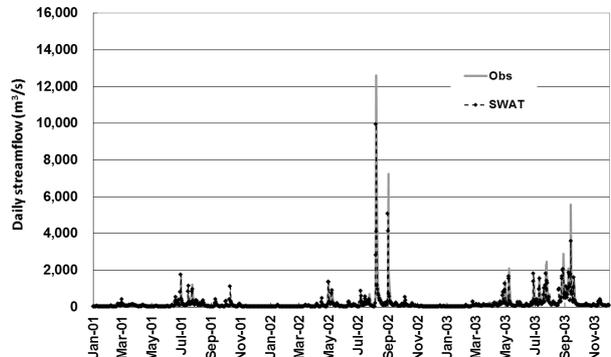
Fig. 3. Study Area (Captured from Kim et al. (2007))

타 중간유출량과 관련된 토양경사장(SLSOIL)을 2배 증가시키고 토양증발보상계수(ESCO)는 0.9를 사용했으며, 하도추적과 관련된 매개변수인 CH\_N (Manning's n)는 수치적 안정성 확보 측면을 고려하고 자연하천임을 감안하여 모형의 기본값 보다 증가시켜 0.030으로 보정하였다.

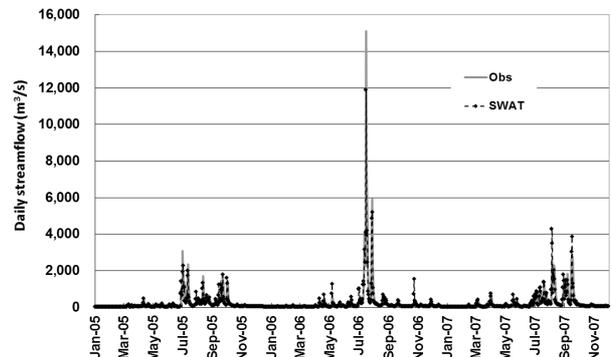
Fig. 4는 개선 전 SWAT으로 모의한 충주댐 유입수문곡선을 관측치와 비교하여 도시한 것으로 흐린 실선은 관측치, 진한 표식 점선은 모의치를 나타낸 것이다. 모의기간동안 연평균 모의유출량은 163.4 m<sup>3</sup>/s로 연평균 관측유출량 161.1 m<sup>3</sup>/s과 서로 잘 일치하



(a) '91-'95



(b) '01-'03



(c) '05-'07

Fig. 4. Comparison of the Observed Stream flow and the Simulated Streamflow using SWAT

였고, 일 유출량에 대한 관측과 모의치간의 결정계수  $R^2$ 와 Nash Sutcliffe 모형 효율계수 NSE는 모두 0.7을 초과하여 검보정이 양호하게 수행되었음을 확인하였다. Fig. 4(a)와 같이 일 유출수문곡선의 침투부를 잘 묘사하고 있고, 유출규모가 작은 경우에는 침투유출량 모의치가 관측치를 잘 구현하고 있는 등 전반적으로 유출수문곡선의 형상이 잘 일치하고 있다. 그러나, Figs. 4(b) and (c)와 같이 2002년, 2006년에 발생한 10,000 m<sup>3</sup>/s를 넘는 침투유출의 경우에는 모의치가 관측치를 잘 따라가지 못하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 모형의 개선 효과

개선 전, 후의 SWAT 모형으로 유역 출구인 충주댐 유입량을 연속적으로 모의하고 모의기간 1986년부터 2007년 동안 발생한 상위 82개 침투유출량을 대상으로 침투유출 증가효과를 평가하였다. Fig. 5는 초과침투량 분할 기법을 적용한 결과로서 침투유출

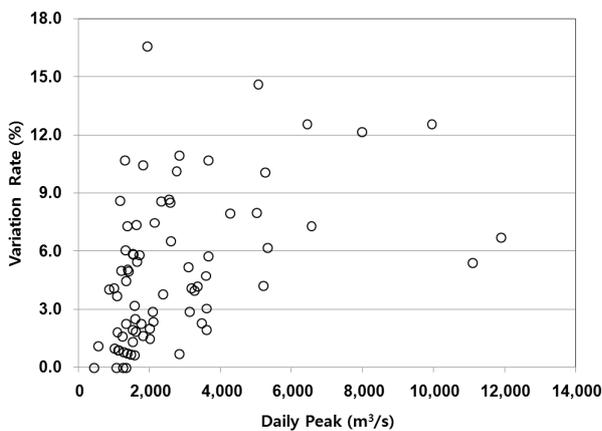


Fig. 5. Variation of Daily Peaks Simulated by SWAT<sub>EXINF</sub> Relative to Those by SWAT

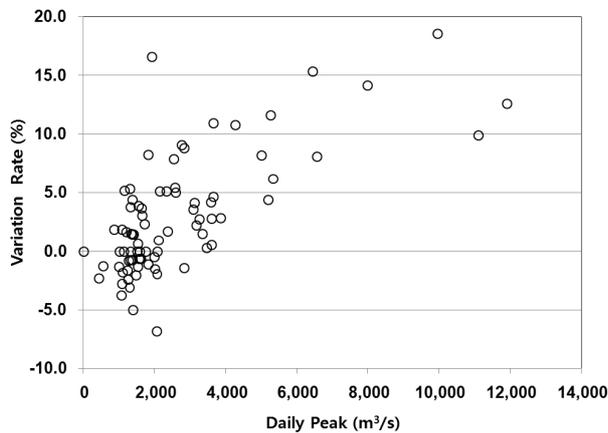


Fig. 6. Differences of Daily Peaks Simulated by SWAT and SWAT<sub>EXINF\_VTC</sub>

크기에 따른 침투유출 변화율을 도시한 것이다. 침투유출 변화율은 개선 후 침투유출 증가 혹은 감소량을 개선 전 침투유출량으로 나누어 백분율로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 비슷한 침투유출 규모라 하더라도 토양수분 조건이 상이하여 침투유출 증가량의 편차가 발생하고 있으며, 침투유출과 그 변화율간의 뚜렷한 상관성은 보이지 않는다. 최대 약 17%, 평균적으로 약 5%의 증가율을 나타내었으며, 특히 최상위 3개의 침투유출에 대한 증가율은 각각 5.4%, 12.5%, 6.7%로 평균치를 상회하였다.

Fig. 6는 초과침투량 분할 기법과 가변 집중시간 산정 기법을 함께 적용하였을 때 침투유출 변화율을 도시한 것으로 초과침투량 분할 기법 단독으로 적용한 경우에 비해 침투유출과 그 변화율간의 상관성을 나타내고 있으며, 일부 작은 유출규모를 제외하고는 전반적으로 침투유출이 더 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 초과침투량의 일부가 지표유출량에 추가로 더해지기 때문에 집중시간 단축에 따른 지표유출 지체 감소로 인한 결과이다. 반면, 3,000 m<sup>3</sup>/s보다 작은 침투유출 규모에서는 그 증가율이 음의 값을 보이고 있다. 이는 가변 집중시간 산정 기법이 지표유출 발생량의 크기에 따라 일별로 지체의 정도를 조정하기 때문에 유출 규모가 큰 경우에는 민감한 증가효과를 가져오지만 유출 규모가 작은 경우에는 지체시간이 개선 전 SWAT에 비해 오히려 길게 계산된 데서 기인한다. 따라서 초과침투량 분할기법과 가변 집중시간 산정기법과 동시에 적용하면 홍수기 유출규모가 큰 사상에 대해서는 침투부 증가효과를, 비홍수기 유출규모가 작은 사상에 대해서는 지체 영향으로 둔감한 유출응답을 기대할 수 있다. 침투유출이 5,000 m<sup>3</sup>/s를 넘는 경우 평균적으로 약 10%를 넘는 침투유출 증가효과를 보였으며, 특히 1990년, 2002년, 2006년 상위 3개의 침투유출에 대한 증가율은 각각 9.9%, 18.6%, 12.6%로서 침투유출 증가효과가 큰 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 초과침투량 분배 및 지표유출지체 알고리즘을 개선한 SWAT으로 모의한 충주댐 유입수문곡선을 관측치와 함께 도시한 것으로 진한 표식 점선은 SWAT<sub>EXINF\_VTC</sub> 모의유량, 흐린 실선은 관측유출량을 나타낸 것이다. SWAT<sub>EXINF\_VTC</sub> 결과가 연평균 유출량(관측: 161.1 m<sup>3</sup>/s, 모의: 162.6 m<sup>3</sup>/s)를 만족하였고, 동시에 일 유출량의 관측과 모의치간의  $R^2$ 와 NSE는 모두 0.7을 초과하여 모의결과가 관측치에 잘 적합하였다. Figs. 7(b) and (c)에서 확인할 수 있듯이 개선 전 모의 결과인 Fig. 4에 비해서 관측 침투유출에 보다 더 근접하고 있다. 특히 2002년, 2006년 큰 홍수사상의 경우 각각 개선 전 SWAT 결과에 비해 각각 약 19%, 13%의 침투유출 증가율을 보이는 등 지표유출량 증가 및 지체 감소의 영향으로 모의 성능이 개선되었다.

침투부 개선 효과를 정량적으로 파악하기 위해서 2,000 m<sup>3</sup>/s를 넘는 침투유출에 대해서 개선 전, 후의 SWAT 모의 결과와 관측치

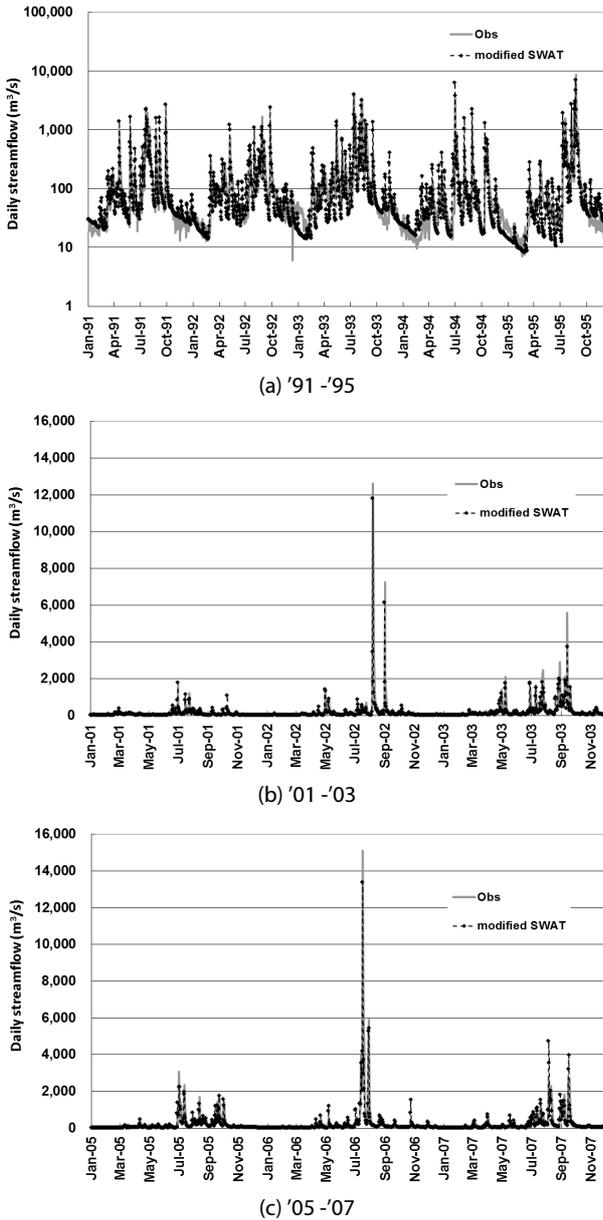


Fig. 7. Comparison of the Simulated Streamflows using SWAT and SWAT<sub>EXINF\_VTC</sub>

를 일대일로 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 일 유출량의 관측치와 모의치간의  $R^2$ 는 개선 전 0.836에서 개선 후 0.861로 증가하였고, NSE 또한 개선 전 0.748에서 개선 후 0.834로 증가하여 지표유출해석 알고리즘 개선 효과가 우수한 것으로 분석되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 유역수문모형 SWAT을 국내 유역에 적용할 경우에 일반적으로 유출수문곡선의 첨두부가 과소하게 산정되는

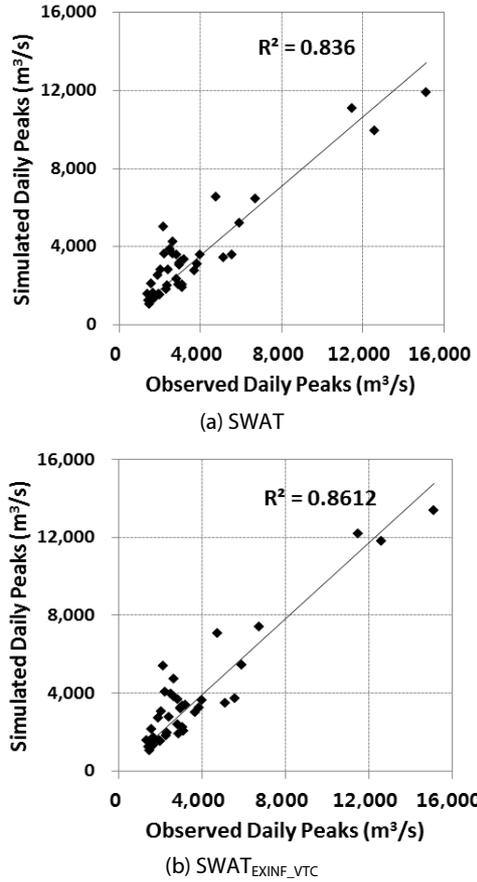


Fig. 8. Comparison of the Simulated and Observed Daily Peaks

단점을 개선하기 위해서 초과침투량 분할기법과 가변집중시간 산정기법을 SWAT의 지표유출해석 모듈에 탑재하였다. 초과침투량 분할기법은 침투량이 토양층의 보유능을 초과한 경우에 그 초과분을 지표유출의 집중시간과 토양수의 연직 이동시간에 역비례하여 지표유출량 및 침투량에 제한당되도록 한 것이고, 가변집중시간 산정기법은 지표유출의 유역내 지체효과를 결정하는 변수인 집중시간을 지표유출량의 크기에 따라 재계산되도록 수정한 것이다. 전자는 토양층이 습윤한 조건에서 지표유출량의 크기를 증가시킬 수 있고, 후자는 큰 호우사상에 대해서 지표유출의 지체를 감소시켜 유출수문곡선의 첨두부를 증가시키고 비홍수기 유출규모가 작은 사상에 대해서는 상대적으로 둔감한 유출 응답을 가져올 수 있다. 충추댐 상류유역을 대상으로 개선 전, 후의 SWAT 모형으로 유출모의를 실시하고 첨두유량 비교를 통해 모형의 개선효과를 평가하였다. 개선 전 SWAT으로 모형의 검보정을 수행한 결과, 전반적으로 관측치와 모의치간에 연평균 유출량과 일 유출수문곡선 형상이 서로 잘 일치하였으나, 2002년, 2006년 유출사상과 같이 큰 홍수가 발생하였던 해에는 첨두유량이 관측치보다 과소하게 모의되는 결과를 보였다. 초과침투량 분할기법 및 가변집중시간

산정기법이 탑재된 개선 SWAT 모형으로 충주댐 지점의 유출수문곡선을 모의하여 개선 전 SWAT 모의 결과와 비교한 결과, 5,000 m<sup>3</sup>/s 이상의 유출규모에 대해 평균적으로 약 10%를 넘게 침투유량이 증가하는 효과를 나타내었으며, 특히 큰 홍수가 발생하였던 1990년, 2002년, 2006년 침투유량에 대한 증가율이 각각 9.9%, 18.6%, 12.6%로 산정되어 침투부 증가 효과가 큰 것으로 분석되었다. 반면에 3,000 m<sup>3</sup>/s 이하의 작은 규모의 유출사상에 대해서는 개선 전 SWAT에 비해 집중시간이 길게 산정되어 침투유량이 감소하는 결과를 나타내었다. 또한 2,000 m<sup>3</sup>/s를 넘는 침투유량에 대해서 개선 전, 후의 모의치와 관측치를 비교한 결과 R<sup>2</sup>와 NSE가 각각 개선 전 0.836, 0.748에서 개선 후 0.861, 0.834로 증가하여 지표유출해석 알고리즘 개선 효과가 우수한 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시한 초과침투량 분할기법 및 가변집중시간 산정 기법의 적용으로 홍수기 유출규모가 큰 사상에 대해서 유출응답의 민감도를 증가시킬 수 있어 하상계수가 큰 국내유역에 SWAT 모형을 적용할 경우 보다 정확도 높은 유출모의 결과를 기대할 수 있다. 특히 토양층이 얇아 토양의 보수능이 작고 경사가 급하여 지표유출이 빠르게 일어나는 산지유역에 개선된 SWAT 모형이 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development." *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Arnold, J. G., Williams, J. R. and Maidment, D. R. (1995). "Continuous time water and sediment routing model for large basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 171-183.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D. and Sammons, N. B. (1990). *SWRRB-A basin scale simulation model for soil and water resources management*, Texas A&M University Press, College Station, p. 255.
- Borah, D. K., Arnold, J. G., Bera, M., Krug, E. C. and Liang, X. Z. (2007). "Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 6, pp. 605-616.
- Bosch, D., Sheridan, J., Batten, H. and Arnold, J. (2004). "Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed." *Transactions of ASAE*, Vol. 47, No. 5, pp. 1493-1506.
- Bryant, R. B., Gburek, W. J., Veith, T. L. and Hively, W. D. (2006). "Perspectives on the potential for hydrogeology to improve watershed modeling of phosphorus loss." *Geoderma*, Vol. 131, pp. 299-307.
- Eckhardt, K., Haverkamp, S., Fohrer, N. and Frede, H.-G. (2002). "SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 641-644.
- Fohrer, N., Haverkamp, S. and Frede, H.-G. (2005). "Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 659-672.
- Govender, M. and Everson, C. S. (2005). "Modelling streamflow from two small south african experimental catchments using the SWAT model." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 683-692.
- Henderson, F. M. and Wooding, R. A. (1964). "Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, No. 8, pp. 1531-1540.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 4. EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS)*, Athens, Ga.: Environmental Protection Agency.
- Izaurrealde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J. and Quiroga, J. M. C. (2006). "Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data." *Ecological Modeling*, Vol. 192, No. 3-4, pp. 362-384.
- Kannan, N., Santhi, C., Williams, J. R. and Arnold, J. G. (2007). "Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behaviour with different evapotranspiration methods." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 13, pp. 2114-2121. DOI: 10.1002/hyp.6811.
- Kim, N. W. and Lee, J. (2008). "Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 25, pp. 4936-4948.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S. and Arnold, J. G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- Kim, N. W., Lee, B. J. and Lee, J. E. (2007). "Analysis of the characteristics of low-flow behavior based on spatial simulated flows." *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 4B, pp. 431-440 (in Korean).
- Kim, N. W. and Lee, J. E. (2005). "Assessment of probability flood according to the flow regulation by multi-purpose dams in Han-River basin." *Journal of Water Resources Research*, Vol. 42, No. 2, pp. 161-169 (in Korean).
- Kim, N. W., Won, Y. S., Lee, J., Lee, J. E. and Jeong, J. (2011). "Hydrological impacts of urban imperviousness in white rock creek watershed." *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 5, pp. 1759-1771.
- Knisel, W. G. (1980). "CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems." *USDA Conservation Research Report*, Vol. 26, p. 643.
- Knisel, W. G., Davis, F. M. and Leonard, R. A. (1994). *GLEAMS VERSION 2.0 Part III: User Manual*, USDA-ARS, Coastal Plain Experiment Station, Southeast Watershed Research Laboratory:

- Tifton, Georgia, 31793.
- Krysanova, V., Wechsung, F. and Arnold, J. G. (2000). *SWIM User Manual*, Potsdam Institute for Climate Impact Research: Potsdam, Germany.
- Kuntiyawichai, K., Schultz, B., Uhlenbrook, S., Suryadi, F. X. and Corzo, G. A. (2011). "Comprehensive flood mitigation and management in the Chi river basin, Thailand." *Lowland Technology International*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-18.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G. and Still, D. A. (1987). "GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems." *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, No. 5, pp. 1403-1428.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. R., Williams, J. R. and King, K. W. (2005). *Soil and water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2000*, Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service: USDA Temple Texas. Published by Texas Water Resources Institute, College Station, TX. TWRI Report TR-191.
- Rossman, L. A. (2004). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0*, Cincinnati, Ohio: U.S. EPA National Risk Management Research Laboratory, Water Supply and Water Resources Division.
- Van Liew, M. W. and Garbrecht, J. (2003). "Hydrologic simulation of the little Washita river experimental watershed using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 413-426.
- Woolhiser, D. A. and Liggett, J. A. (1967). "Unsteady one-dimensional flow over a plane—the rising hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 753-771.
- Xie, X. and Cui, Y. (2011). "Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice." *Journal of Hydrology*, Vol. 396, No. 1, pp. 61-71.
- Yen, B. C. and Chow, V. T. (1983). *Local design storms: Vol. III*, H 38 FHWA-RD-82/065, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.